



TUGAS AKHIR - MO141326

**ANALISA PIPA GAS BARU PT. JOB PERTAMINA-
TALISMAN JAMBI MERANG BERBASIS KEANDALAN**

**ISMOYO ADI PRADANA
NRP. 4312 100 087**

**Dosen Pembimbing :
Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D
Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D**

**JURUSAN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**



UNDERGRADUATE THESES - MO141326

**PT. JOB PERTAMINA-TALISMAN JAMBI MERANG
NEW GAS PIPELINE REALIBILITY ANALYSIS**

ISMOYO ADI PRADANA
NRP. 4312 100 087

SUPERVISORS :

Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D

Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA PIPA GAS BARU PT. JOB PERTAMINA-TALISMAN JAMBI MERANG BERBASIS KEANDALAN

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ISMOYO ADI PRADANA

NRP. 43 12 100 087

Disetujui oleh :

1. Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D. (Pembimbing 1)
.....
2. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.Eng., Ph.D. (Pembimbing 2)
.....
3. Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D. (Penguji 1)
.....
4. Sujantoko, S.T., M.T. (Penguji 2)
.....
5. Dr. Ir. Wisnu Wardhana, M.Sc. (Penguji 3)
.....

Surabaya, July 2016

ANALISA PIPA GAS BARU PT. JOB PERTAMINA-TALISMAN JAMBI MERANG BERBASIS KEANDALAN

Nama Mahasiswa : Ismoyo Adi Pradana
NRP : 4312100087
Jurusan : Teknik Kelautan FTK-ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D
Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D

ABSTRAK

Pipeline merupakan salah satu metode yang biasa digunakan untuk mentransportasikan fluida dari satu lokasi ke lokasi lainnya. PT. JOB PERTAMINA-TALISMAN JAMBI MERANG memiliki *pipeline* 8,6" yang berlokasi di daerah rawa-rawa. Agar *pipeline* aman dari aktifitas daratan, maka *pipeline* tersebut dipendam di dalam tanah. Pada kasus ini *pipeline* mengalami *upheaval buckling* dan sedang akan diperbaiki dengan cara mengaplikasikan *expansion loop* kedalam design baru *pipeline* tersebut. Ukuran dari *expansion loop* yang akan diterapkan dalam design memiliki bentuk *u-shape* dengan ukuran panjang 6 m dan lebar 6 m. Sebelum design baru diaplikasikan perlu dilakukan analisa keandalan dari design baru tersebut. Analisa keandalan akan dilakukan dengan menggunakan metode Monte Carlo, karena dalam mendesign *pipeline* tersebut masih terdapat variabel-variabel yang tidak pasti. Dalam analisa keandalan dengan menggunakan metode Monte Carlo diperlukan persamaan moda kegagalan yang dapat menggambarkan kapan sebuah sistem akan mengalami kegagalan. Kemudian dari moda kegagalan yang sama dapat dipilih design *expansion loop* yang terbaik berdasarkan keandalannya. Setelah dilakukan analisa didapatkan bahwa *expansion loop* dengan ukuran panjang 6 m dan lebar 4 m memiliki keandalan terbaik dengan keandalan 0,9156 atau 91,56%.

Kata Kunci : *upheaval buckling*, *pipeline*, *expansion loop*, Monte Carlo, keandalan

**PT. JOB PERTAMINA-TALISMAN JAMBI MERANG NEW GAS
PIPELINE REALIBILITY ANALYSIS**

Student Name : Ismoyo Adi Pradana
Reg. Number : 4312100087
Department : Teknik Kelautan FTK-ITS
Supervisors : Prof. Ir. Daniel M. Rosyid, Ph.D
Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D

ABSTRACT

Pipeline is a methods commonly used to transport fluid from one location to another. PT. JOB PERTAMINA-TALISMAN JAMBI MERANG has a 8.6” pipeline located in a marshy area. To safe pipeline from mainland activities, then pipeline buried in the ground. This pipeline suffered upheaval buckling and was going to be fixed by applying loop expansion into pipeline new design. The size of expansion loop that will be implemented in the future has a u-shape with a length of 6 m and a width of 6 m. Reability analysis is needed before new design is applied. Reliability analysis will be using Monte Carlo method, as in the design of the pipeline there are variables that are uncertain. In Monte Carlo method there was an equation of failure mode to describe when the system is going to failure. Then from the same equation can be used to find which expansion loop have the best score in reliability. At the end of reliability analysis, expansion loop with the best score in reliability is expansion loop with a length of 6 m and a width of 4 m with reliability of 0,9156 or 91,56%

Kata Kunci : upheaval buckling, pipeline, expansion loop, Monte Carlo, keandalan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Analisa	5
1.4 Batasan Masalah	5
BAB II	7
2.1 Pipeline	7
2.2 Buckling	9
2.2.1 Konsep Umum <i>Upheaval Buckling</i>	10
2.3 Tegangan Pada Pipa	12
2.3.1 Tekanan Internal	12
3.2.2 Tegangan Eksternal	14
3.3 Expansion loop	16
3.4 Analisa Keandalan	17
3.4.1 Konsep Dasar Keandalan	17
3.4.2 Moda Kegagalan	18
3.4.3 Simulasi Monte Carlo	19
BAB III	21
3.1 Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian	22
3.2.1 Identifikasi Masalah	22
3.2.2 Studi Literatur	23
3.2.3 Pengumpulan Data	23
3.2.4 Menentukan Moda Kegagalan	23
3.2.5 Menentukan Random Variabel Pada Sistem	24
3.2.6 Menginput RNG Kedalam Moda Kegagalan	24
3.2.7 Menghitung Probability of Failure	24

3.2.8	Menghitung Keandalan	25
BAB IV		27
4.1	Identifikasi Masalah	27
4.2	Tegangan Pada Pipa	27
4.2.1	Tekanan Internal.....	28
4.2.2	Tekanan Eksternal.....	29
4.3	<i>Pressure Drop</i>	34
4.4	Design <i>Expansion Loop</i> Baru.....	35
4.5	Keandalan Dengan Metode Monte Carlo	40
4.5.1	Moda Kegagalan	41
4.5.2	Random Variabel	42
4.5.3	<i>Random Number Generate</i> (RNG).....	43
4.5.4	Input RNG Kedalam Moda Kegagalan	43
4.5.5	<i>Probability of Failure</i>	47
4.5.6	Keandalan.....	48
BAB V.....		50
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran.....	52
DAFTAR PUSTAKA		53
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Peta Lokasi Operasi.....	1
Gambar 1.2. Kondisi pipa pada saat <i>upheaval buckling</i>	3
Gambar 1.3. Kondisi pipa setelah diperbaiki.....	4
Gambar 2.1. a) <i>Local buckling</i> dan b) <i>Global buckling</i>	9
Gambar 2.2. Skema mekanisme terjadinya <i>upheaval buckling</i>	12
Gambar 2.3. Ilustrasi design <i>expansion loop</i>	17
Gambar 2.4. Ilustrasi balok-kolom yang mengalami gaya aksial dan transversal.....	18
Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.....	22
Gambar 4.1. Kondisi pipa <i>upheaval buckling</i>	27
Gambar 4.2. Ilustrasi kondisi pipa dengan tanah jenuh.....	32
Gambar 4.3. Diagram alir analisa keandalan dengan metode simulasi Monte Carlo.....	41

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Data pipa dan parameter operasinya.....	2
Tabel 4.1 Massa jenis tanah kering.....	31
Tabel 4.2 Tegangan efektif tanah kering.....	31
Tabel 4.3 Massa jenis tanah jenuh.....	32
Tabel 4.4 Tegangan efektif tanah jenuh.....	33
Tabel 4.5 Tegangan ijin untuk pipa gas.....	35
Tabel 4.6 <i>Pressure drop expansion loop</i>	37
Tabel 4.7 Tegangan <i>hoop</i> akibat <i>expansion loop</i>	38
Tabel 4.8 <i>Longitudinal stress</i> akibat <i>expansion loop</i>	39
Tabel 4.9 Tegangan ekivalen akibat <i>expansion loop</i>	39
Tabel 4.10 Input RNG ke moda kegagalan untuk <i>expansion loop</i> 6 x 4 m.....	43
Tabel 4.11 Input RNG ke moda kegagalan untuk <i>expansion loop</i> 6 x 5 m.....	44
Tabel 4.12 Input RNG ke moda kegagalan untuk <i>expansion loop</i> 6 x 6 m.....	45
Tabel 4.13 Input RNG ke moda kegagalan untuk <i>expansion loop</i> 6 x 7 m.....	46
Tabel 4.14 Input RNG ke moda kegagalan untuk <i>expansion loop</i> 6 x 8 m.....	47
Tabel 4.15 <i>Probability of failure</i> tiap design <i>expansion loop</i>	48
Tabel 4.16 Keandalan tiap design <i>expansion loop</i>	49

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Bahwa pengaruh variasi densitas tanah sangat berpengaruh terhadap keandalan pipa. Karena densitas tanah merupakan sebuah variabel yang sangat penting untuk dapat menghitung besarnya tegangan efektif tanah yang bekerja pada pipa. Tegangan efektif tanah tersebut untuk kasus *upheaval buckling* berfungsi sebagai gaya penahan untuk pipa agar pipa yang terpendam dalam tanah (*buried pipeline*) tersebut dapat tetap dalam posisinya.
2. Design terbaru jelas lebih baik. Karena adanya *pressure drop* yang diakibatkan oleh adanya pengaplikasian *expansion loop* membuat tegangan ekivalen pipa tidak sebesar design awal pipa yang tidak menggunakan *expansion loop*. Adapula perbedaan tekanan isi antara design lama dan design baru adalah 4,501 MPa. Dan Tegangan ekivalen juga menurun dari 194,01 MPa menjadi 179,01 MPa
3. Dilihat dari hasil perhitungan keandalan, ukuran yang paling optimal adalah design *expansion loop* dengan ukuran 6 x 4 m dengan keandalan terbaik sebesar 0,9156. Memang benar bahwa penurunan tekanan isi dapat membuat tegangan ekivalen cenderung berkurang, tetapi *longitudinal stress* tidak demikian. Karena *longitudinal stress* terdapat dua gaya yang bekerja yaitu akibat adanya perubahan temperature dan *poisson's effect* akibat tekanan isi. *Longitudinal stress* merupakan tegangan resultan hasil penjumlahan dua gaya yang berbeda arah tersebut. Karena berkurangnya tekanan isi membuat *poisson's effect* tidak cukup kuat untuk menetralsisir perubahan temperature. Sehingga defleksi pada pipa akan cenderung dapat tetap terjadi.

5.2 Saran

Saran dalam penelitian ini adalah,

1. Dapat melakukan perhitungan keandalan *expansion loop* 6 x 6 m dengan ragam ketebalan yang berbeda-beda. Sehingga dapat diketahui *expansion loop* 6 x 6 m dengan ketebalan berapakah yang memiliki keandalan terbaik.
2. Mencoba merubah design *expansion loop* dengan bentuk yang lainnya. Lalu kemudian dibandingkan dengan design *expansion loop u-shape*.
3. Dapat melakukan simulasi Monte Carlo dengan menggunakan software-software pendukung, seperti Mini Tab dan lain sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

- Diptagama, I Wayan. 2008. *Analisa Kegagalan Secara Kuantitatif Onshore Pipeline Berdasarkan API 581 BRD*. Tugas Akhir Program Studi Teknik Mesin ITB
- Elanda, Redian Wahyu. 2011. *Analisa Keandalan Pipa Lurus Akibat Korosi Eksternal Pada Jalur Pipa Transmisi Gas Dengan Menggunakan Simulasi Monte Carlo*. FTUI. Depok
- Palmer, A.C. 1990. "Design of Submarine Pipelines Against Upheaval Buckling". Offshore Technology Conference. Texas
- Rosyid, D.M. 2007. *Pengantar Rekayasa Keandalan*. Surabaya : Airlangga University Press.
- Hariono. 2016. *Analisa Pemasangan Loop Ekspansi Akibat Terjadinya Upheaval Buckling Pada Onshore Pipeline*
- Abdi, Khusnul. 2010. *Analisa Umur Kelelahan Pada Bottom Plate FPSO Dengan Metode Elastic Plastic Fracture Mechanics Berbasis Keandalan*. Surabaya. ITS
- Incopera, Frank P.; Dewitt, David P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (5 ed.)*. John Wiley & Sons, Inc.

BIODATA PENULIS



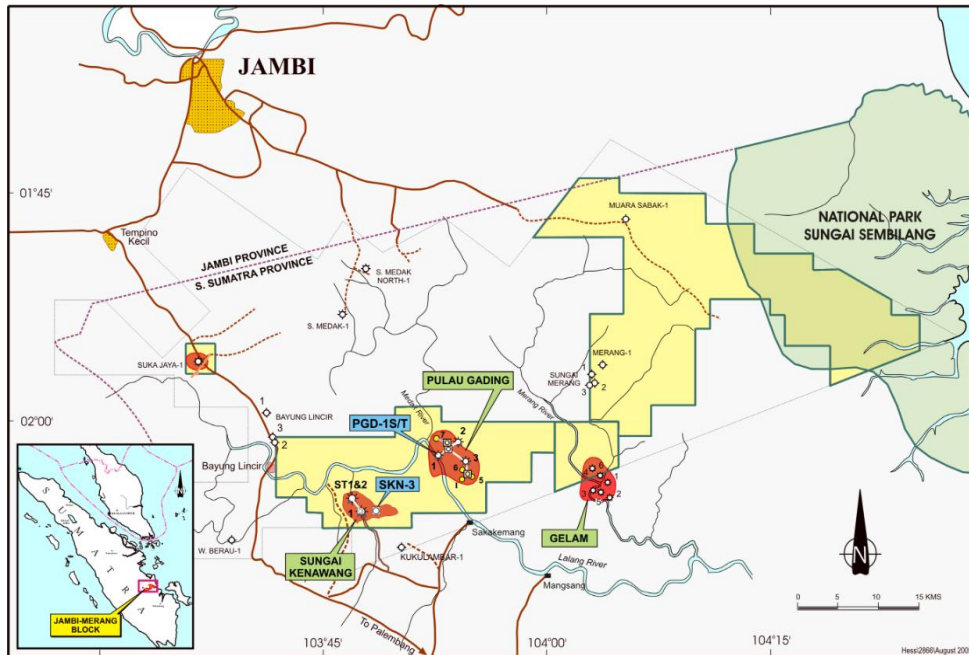
Ismoyo Adi Pradana dilahirkan pada 23 September 1994 di Palembang, merupakan anak pertama dari empat bersaudara. Penulis pada saat ini berdomisili di Jakarta Barat, DKI Jakarta. Penulis merupakan lulusan SD Patra Dharma 3 Balikpapan, SMPN 111 Jakarta Barat dan SMAN 78 Jakarta Barat. Pada saat ini penulis tengah menjalankan pendidikan Strata-1 di Jurusan Teknik Kelautan. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan studi Strata-1 penulis di ITS. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik dengan alamat ismoyoap@gmail.com

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

JOB Pertamina Talisman Jambi Merang merupakan perusahaan gabungan antara PT. Pertamina Hulu Energi, Talisman Ltd dan Pacific Oil & Gas Ltd. JOB Pertamina Talisman Jambi Merang mengelola 3 Blok gas bumi yang berlokasi di daerah Jambi. Salah satu Blok gas bumi yang dikelola adalah blok gas Pulau Gading. JOB Pertamina Talisman Jambi Merang memanfaatkan *onshore pipeline* untuk mentransmisikan gas bumi ke tempat pengolahan terdekat di daerah Sungai Kenawang.



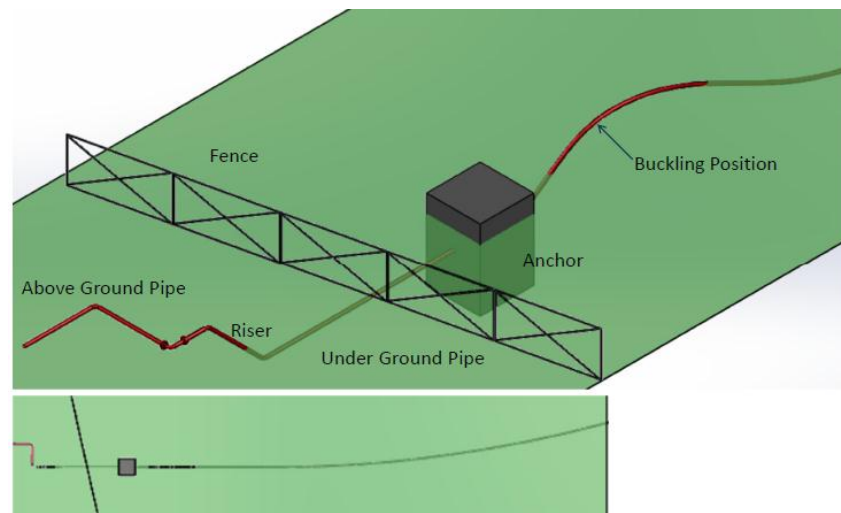
Gambar 1.1 Peta Lokasi Operasi

Pada blok gas Pulau Gading salah satu sumurnya yang bernama PGD-3 terdapat sebuah masalah, yaitu pipa *flowline* yang dipendam didalam tanah terangkat menuju ke atas permukaan tanah atau dapat disebut juga peristiwa *upheaval buckling*. Spesifikasi pipa yang mengalami *upheaval buckling* adalah pipa API 5L Grade X52 dengan outer diameter sebesar 219 mm (8,6 inch). Pipa ini didesign untuk beroperasi selama 20 tahun.

Tabel 1.1 Data pipa dan parameter operasinya

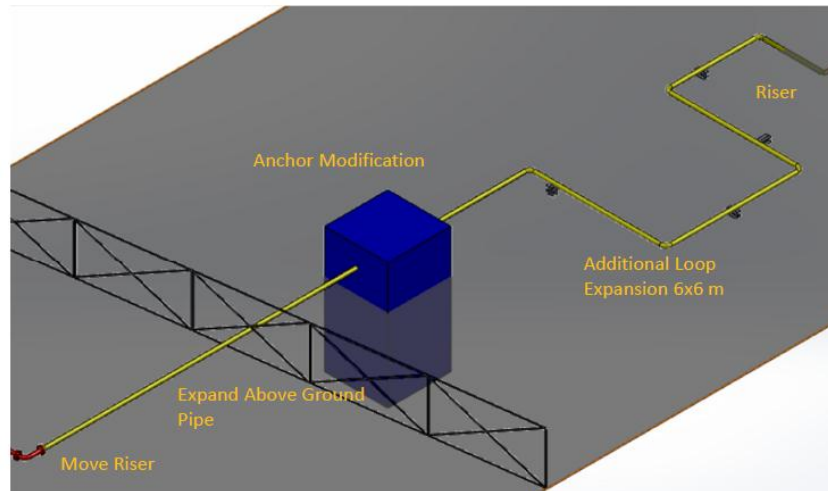
Pipeline Data		
Parameter	Unit	Value
Outside Diameter	mm	219
Pipe Wall Thickness	mm	12,7
Material Grade	-	API-5L X52
Poisson's Ration	-	0,3
SMYS	MPa	359
SMTS	MPa	455
Thermal Expansion Coefficient	°C ⁻¹	11,7 x 10 ⁻⁶
Steel Density	kg/m ³	7850
Young's Modulus	GPa	203
Operating Parameter		
Design Life	Year	20
Pipeline Services	-	Gas
Gas Density	kg/m ³	50
Design Pressure	MPa	17,823
Max. Operating Pressure	MPa	7,791
Max. Operating Temp	°C	101,67
Ambient Temperature	°C	29,4
Soil Parameter		
Soil Type	-	Clay to Silty Clay
Soil Bulk Density	kg/m ³	1600-2650
Axial Soil Friction Coefficient	-	0,3
Lateral Soil Friction Coefficient	-	0,5
Undrained Shear Strength	kPa	15-235
Density of Soil Cover	kg/m ³	1600-2650
Angle of Internal Friction	degree	0-24,4
Average Burial Cover Height	m	2

Pada tahun 2013 pipa *flowline* ini terdeteksi telah mengalami *upheaval buckling* dengan ketinggian defleksi maksimum hingga 1,5 m dan telah menjalar ke sepanjang 62,37 m. Kemudian pada tahun yang sama *flowline* tersebut dinonaktifkan untuk inspeksi dan perbaikan lebih lanjut, agar tidak terjadi kecelakaan kerja. Pipa tersebut sampai pada saat ditemukan *upheaval buckling* telah beroperasi sejak 1999 yang berarti telah menempuh masa operasinya selama 14 tahun.



Gambar 1.2 Kondisi pipa pada saat *upheaval buckling*

Pada tahun 2015 lalu pipa *flowline* tadi tengah dilakukan perbaikan. Dengan cara menambahkan *expansion loop* pada design pipa yang berfungsi untuk meminimalisir gaya aksial efektif yang bekerja pada pipa. Pada dasarnya *upheaval buckling* dapat terjadi karena gaya tahanan tanah tidak mampu lagi menahan gaya vertikal ke atas pipa akibat adanya gaya aksial efektif yang bekerja pada pipa. Sehingga mengaplikasikan *expansion loop* pada pipa perlu dilakukan untuk mengurangi gaya tersebut. *Expansion loop* mengurangi gaya dengan cara berdeformasi secara terukur. Sehingga deformasi tidak menjalar keseluruhan bagian pipa.



Gambar 1.3 Kondisi pipa setelah diperbaiki

Dengan latar belakang diatas analisa keandalan menjadi hal yang perlu dilakukan. Analisa keandalan dilakukan untuk melihat apakah design pipa yang telah diperbaiki memiliki keandalan yang lebih baik dibandingkan dengan keandalan dari design pipa yang lama. Metode penganalisaan dengan menggunakan metode Monte Carlo untuk membantu dalam proses perhitungan.

1.2 Perumusan Masalah

Beberapa permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah :

1. Apa pengaruh variasi densitas tanah terhadap keandalan pipa ?
2. Manakah design yang lebih baik antara design awal pipa dengan design terbaru pipa dilihat dari sudut pandang keandalan ?
3. *Expansion loop* dengan ukuran yang seperti apakah yang memiliki keandalan yang terbaik ?

1.3 Tujuan Analisa

Tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh variasi densitas tanah dan kedalaman pipa dipendam terhadap keandalan pipa dari bahaya *upheaval buckling*.
2. Mengetahui design manakah yang lebih dapat diandalkan antara design lama dengan design yang baru.
3. Dapat memilih bentuk *expansion loop* pipa yang memiliki keandalan yang terbaik.

1.4 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Penelitian tugas akhir ini hanya ditujukan untuk *pipeline*, tidak termasuk fasilitas – fasilitas pendukung lainnya.
2. Kondisi tanah dilokasi berupa tanah lempung sedikit berpasir (*clay to silty clay*) dan dianggap homogen.
3. Pengaruh korosi pada pipa diabaikan.
4. Pipa didesign dengan masa operasional mencapai 20 tahun.
5. Pipa yang digunakan memiliki *material grade* API-5L X52 dengan *outside diameter* 219 mm (8,6 inch) dan *wall thickness* 12,7 mm
6. Pipa didesign untuk mengalirkan gas dari sumur menuju ke fasilitas pengolahan.
7. Data tanah diasumsikan dengan menggunakan *Random Number Generate* dalam range yang diketahui.
8. Gaya gesek fluida terhadap dinding pipa diabaikan.

(Halaman ini Sengaja Dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Pipeline

Pipeline atau biasa disebut pipa penyalur merupakan salah satu jenis sarana transportasi untuk mentransmisikan *fluida* baik dalam bentuk cair maupun dalam bentuk gas. Dari fungsinya yang cukup beragam *pipeline* banyak digunakan pada industri minyak bumi dan gas. Pada industri minyak dan gas *pipeline* dapat digunakan untuk menyalurkan *fluida* dari sumur menuju tempat pengolahan atau antar bangunan lepas pantai (*offshore facility*) maupun antar fasilitas yang ada di darat (*onshore facility*).

Menurut Diptagama (2008) *Pipelines* dibagi menjadi tiga kategori :

1. *Export line / Trunk line*

Export pipeline adalah *pipeline* yang menyalurkan minyak atau gas olahan antara satu platform ke platform lainnya atau antara platform dengan fasilitas di darat.

2. *Flowline*

Flowline adalah *pipeline* yang menyalurkan *fluida* dari sumur pengeboran ke *downstream process component* yang pertama.

3. *Injection line*

Injection line adalah *pipeline* yang mengarahkan cairan atau gas untuk mendukung aktivitas produksi (contoh: injeksi air atau injeksi gas, gas lift, *chemical injection line*).

Menurut Elanda (2011), sebuah *pipeline* harus mempunyai beberapa kriteria yang harus dipenuhi sebagai berikut :

1. Mampu menahan tekanan akibat *fluida* didalamnya (tekanan).

Untuk mengalirkan *fluida* dari satu titik ke titik lainnya memerlukan suatu perbedaan tekanan. Tanpa perbedaan tekanan tersebut *fluida* tidak akan dapat mengalir. Selain itu untuk proses tertentu hanya dapat terlaksana pada tekanan tertentu. Sehingga suatu pipa dalam sebuah *pipeline* harus mampu menahan beban akibat

tekanan tersebut supaya *fluida* yang didalamnya tidak mengalami kebocoran dan mengalir keluar.

2. Mampu mengatasi gaya gesek akibat aliran *fluida*

Aliran *fluida* didalam pipa tersebut akan mengakibatkan gaya gesek terhadap dinding pipa akibat adanya viskositas dari *fluida* dan kecepatan alirannya. Semakin besar viskositas *fluida* tersebut akan semakin besar gaya gesek yang ditimbulkannya, sehingga suatu pipa harus mampu menahan gaya gesek yang ditimbulkan *fluida* tersebut.

3. Mampu mengatasi momen akibat gaya berat pipa (beban static) dan *fluida* didalamnya (beban dinamik) serta akibat gaya-gaya luar.

Berat pipa beserta *fluida* didalamnya yang tidak kecil tersebut harus mampu ditahan oleh tumpuan dan sambungan *flange* yang ada. Semakin panjang jarak tumpuannya maka semakin berat momen yang dihasilkan sehingga memerlukan kekuatan tumpuan dan sambungan *flange* yang lebih besar.

4. Mampu mengatasi beban *fatigue*

Rotating equipment seperti pompa dan generator yang selalu berputar mengakibatkan beban *fatigue* terhadap *pipeline* yang berhubungan langsung terhadapnya. Dengan adanya beban *fatigue* dapat mengakibatkan jenis kegagalan tersendiri terhadap *pipeline* tersebut. Sehingga sebuah *pipeline* harus memiliki kemampuan untuk menahan beban *fatigue*.

5. Mampu mengatasi beban *thermal*

Fluida didalam *pipeline* tersebut beroperasi pada temperature yang berbeda-beda tergantung pada proses yang dilakukan. Temperatur yang tinggi tersebut mengakibatkan material pipa mengalami ekspansi. Sehingga suatu *pipeline* harus dapat menahan beban ekspansi yang diakibatkan temperatur yang tinggi tersebut.

2.2 Buckling

Buckling adalah peristiwa deformasi plastis yang dapat terjadi pada *pipeline*. Deformasi plastis dapat terjadi karena adanya tekanan berlebihan diluar batas *yield* nya.

Buckling dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu :

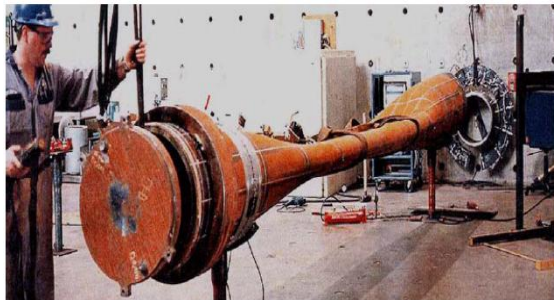
a. *Local buckling*

Local buckling adalah deformasi plastis pada penampang pipa yang dapat disebabkan oleh adanya tekanan eksternal dan momen bending. Kombinasi antara tekanan dan momen tadi dapat menyebabkan *collapse* (penyok) yang dapat merambat terus di sepanjang pipa. Hal ini biasa disebut dengan *propagating buckling*.

b. *Global buckling*

Global buckling adalah jenis *buckling* dengan defleksi berlebih yang terjadi pada keseluruhan *pipeline* tidak hanya pada penampangnya saja. *Global buckling* memiliki tiga jenis, yaitu :

- i.) *Upheaval buckling* pada pipa terpendam
- ii.) *Lateral buckling*, dan
- iii.) *Downward* pada *freespan*



(a)



(b)

Gambar 2.1 a) *Local buckling* dan b) *Global buckling*

2.2.1 Konsep Umum *Upheaval Buckling*

Ketika kita mendesign sistem *pipeline* haruslah kuat untuk menahan beban operasi dan beban pada saat instalasi. Selama *pipeline* beroperasi akan mengalami pembebanan internal dan external berupa tekanan dan temperatur.

Ide dilakukannya pemendaman *pipeline* adalah untuk melindungi *pipeline* dari kemungkinan terjadi kejadian-kejadian yang dapat merusak *pipeline* akibat dari aktivitas manusia maupun dari bencana alam di permukaan. Selain itu *pipeline* sengaja dipendam didalam tanah untuk meminimalisir dampak langsung kerusakan *pipeline* pada manusia disekitarnya apabila mengalami kegagalan total.

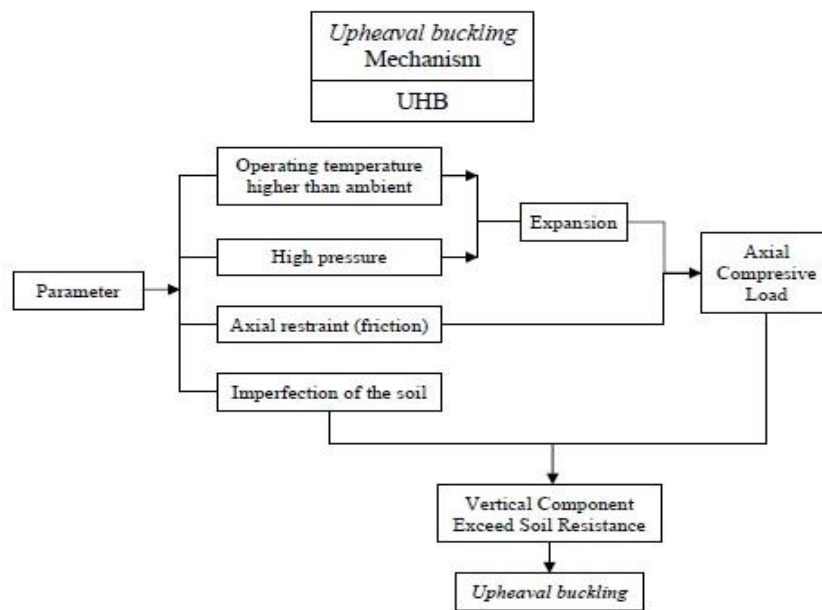
Pada saat pipa beroperasi, temperatur pipa akan mengalami kenaikan temperatur yang signifikan dibandingkan dengan temperatur pipa pada saat tidak beroperasi yang menyebabkan pipa mengalami elongasi (memanjang) yang besarnya tergantung dari karakteristik material yang digunakan oleh pipa tersebut. Namun pada saat pipa dipendam didalam tanah pipa tidak dapat berelongasi, karena pipa menerima gaya friksi tanah yang berfungsi sebagai gaya tahanan tanah. Selain itu berat timbunan dari tanah yang berada diatas pipa ikut memberikan tekanan sehingga pipa semakin tidak bisa berelongasi. Kombinasi antara gaya-gaya eksternal dan internal seperti perbedaan temperature, tekanan, dan gaya friksi tanah tersebut menghasilkan gaya aksial tekan efektif yang bekerja pada pipa.

Upheaval buckling pada awalnya dapat terjadi karena adanya lekukan awal atau ketidaklurusan yang terjadi akibat kesalahan pada saat instalasi atau ketidakrataan tanah tempat pipa diletakkan. Dari ketidakrataan tanah tersebutlah timbul titik lemah pada pipa yang mana pada lokasi tersebut pipa tidak tersupport dengan baik. Sehingga gaya aksial efektif pipa berubah menjadi gaya tekan vertikal keatas. Pada awalnya gaya vertikal tersebut akan ditahan oleh berat tanah. Jika total dari berat tanah pada lapisan atas pipa tersebut tidak cukup kuat untuk menahan gaya vertikal pipa, maka bagian pipa yang berada pada ketidakrataan tanah tadi akan bergerak keatas mendorong timbunan tanah yang ada diatasnya. Setelah melalui waktu yang cukup pipa akan memiliki *displacement* yang cukup besar untuk menembus permukaan tanah. Fenomena inilah yang disebut dengan *upheaval buckling*.

Adapun proses terjadinya *upheaval buckling* adalah sebagai berikut :

1. Semuanya dimulai pada saat dilakukan instalasi *pipeline*, ketidakrataan permukaan tanah atau parit (*trench*) memang tidak dapat dihindari. Selain itu juga terdapat faktor ketidaklurusan pipa yang disebabkan karena kesalahan instalasi atau rute *pipeline* yang tidak lurus.
2. Ketika pipa sudah dipendam dan akan mulai beroperasi, gaya aksial mulai terbentuk karena adanya perbedaan temperatur pada saat instalasi dengan pada saat pipa mulai beroperasi serta adanya gaya aksial tekanan *fluida*.
3. Kombinasi antara gaya aksial pipa, ketidakrataan tanah dan ketidaklurusan pipa akan memulai terjadinya *upheaval buckling* yang menyebabkan gaya aksial efektif pipa berubah menjadi gaya tekan vertikal ke atas.
4. Awalnya gaya tekan vertikal ke atas akan ditahan oleh gaya tahanan tanah yang diperoleh dari berat timbunan tanah yang ada di atasnya dan berat pipa itu sendiri, namun apabila gaya tahanan tersebut tidak dapat lagi menahan gaya vertikal keatas akan membuat pipa akan terdorong keatas melengkung hingga menembus permukaan tanah.

Oleh karena itu dalam mendesign pipa haruslah mendukung agar *buckling* tidak cepat terjadi karena sudah sewajarnya apabila sebuah material dipanaskan pada temperatur tertentu dan dilakukan secara terus-menerus akan berelongasi. Cara untuk mengurangi potensi terjadinya *upheaval buckling* adalah dengan menambah berat lapisan tanah di atas pipa atau melakukan modifikasi terhadap design pipa itu sendiri. Modifikasi design yang dapat dilakukan untuk mengurangi potensi *upheaval buckling* adalah dengan mengaplikasikan *expansion loop* pada design pipa. Fungsi dari *expansion loop* ini adalah mengurangi gaya aksial efektif pipa dengan cara membiarkan pipa berelongasi pada *expansion loop* tersebut. Keuntungan dari *expansion loop* adalah elongasi pipa dapat dikontrol sehingga elongasi tidak menyebar sepanjang pipa. Berikut ini adalah gambar mekanisme terjadinya *upheaval buckling* ditunjukkan pada skema berikut ini :



Gambar 2.2 Skema mekanisme terjadinya *upheaval buckling*

2.3 Tegangan Pada Pipa

Pada saat pipa beroperasi pipa akan menerima banyak tekanan yang berasal dari fluida yang ada di dalam pipa, maupun tekanan yang berasal dari lingkungan sekitarnya. Tekanan-tekanan ini perlu diperhitungkan untuk mengetahui seberapa besar tegangan yang bekerja pada pipa tersebut.

2.3.1 Tekanan Internal

Fluida yang ditransmisikan oleh pipa sudah tentu memiliki temperatur dan tekanan. Temperatur dan tekanan ini memberikan tekanan internal pada pipa terutama pada dinding pipa bagian dalam. Tekanan dari fluida ini kemudian menimbulkan reaksi pada dinding pipa tersebut. Tekanan ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *Hoop Stress* yang menghitung besarnya tegangan yang terjadi pada bagian internal pipa tersebut. Berikut ini adalah persamaan *Hoop Stress* yang digunakan untuk mengetahui tegangan internal pipa.

$$\sigma_h = \frac{P_i}{2t} D_o \quad (3.1)$$

dengan :

σ_h = *Hoop Stress* (MPa)

- P_i = Tekanan internal (MPa)
 t = Ketebalan nominal dinding pipa (m)
 D_o = Diameter terluar pipa (m)

Tegangan hoop ini kemudian menjadi pemicu terjadinya tegangan longitudinal. Tegangan longitudinal adalah tegangan yang arahnya sejajar dengan pipa. Hal ini dapat terjadi karena dinding pipa yang terekspos oleh temperatur dan tekanan fluida akan mengalami ekspansi yang dapat menyebabkan tegangan pada pipa tersebut.

Pada tegangan longitudinal ada dua macam tegangan yang bekerja yaitu tegangan longitudinal akibat temperatur dan tegangan longitudinal akibat *poisson's effect*. Penjumlahan dari kedua tegangan inilah yang menjadi tegangan longitudinal yang bekerja pada pipa. Sehingga didapatkan persamaan tegangan longitudinal sebagai berikut.

$$\sigma_L = \nu \cdot \sigma_h - E \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.2)$$

dengan :

- σ_L = Tegangan Longitudinal (MPa)
 ν = *Poisson's ratio*
 σ_h = Tegangan Hoop (MPa)
 E = Modulus Young (MPa)
 α = Thermal Expansion Coeff ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 T_2 = Suhu Operasi Maksimum ($^{\circ}\text{C}$)
 T_1 = Suhu Pada Saat Instalasi ($^{\circ}\text{C}$)

Setelah sebelumnya didapatkan besarnya tegangan *hoop* dan tegangan longitudinal. Tegangan-tegangan tadi tidaklah pada satu sumbu yang sama, dimana tegangan hoop adalah tegangan pada permukaan dalam pipa sedangkan tegangan longitudinal adalah tegangan sejajar arah pipa. Maka diperlukan persamaan *Von Misses*, persamaan ini berfungsi untuk mencari besarnya resultan

dari tegangan-tegangan tadi sehingga besarnya tegangan internal dari pipa tersebut dapat diketahui. Berikut ini adalah persamaan *Von Misses* yang dapat digunakan.

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_h \cdot \sigma_L} \quad (3.3)$$

dengan :

σ_E = Tegangan resultan *von misses* (MPa)

σ_h = Tegangan Hoop (MPa)

σ_L = Tegangan Longitudinal (MPa)

2.3.2 Tegangan Eksternal

Pada tekanan eksternal yang mempengaruhi pipa, yang paling berpengaruh adalah dari besarnya tegangan efektif tanah yang bekerja pada pipa. Tegangan efektif adalah tegangan yang terjadi akibat berat tanah efektif yang mempengaruhi kekuatan geser dan perubahan volume pada tanah. Adapula persamaan untuk mengetahui besarnya tegangan efektif tanah adalah sebagai berikut.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.4)$$

dengan :

σ' = Tegangan efektif tanah (MPa)

σ = Tegangan total tanah (MPa)

u = *Pore Water Pressure* (MPa)

Oleh karena itu, untuk mengetahui besarnya tegangan efektif tanah, maka perlu diketahui terlebih dahulu besarnya tegangan total tanah dan besarnya *pore water pressure*. Tegangan total tanah adalah tegangan total yang terjadi akibat penjumlahan tegangan efektif tanah dengan tegangan yang dihasilkan air atau udara yang ada di pori-pori tanah. Adapun persamaan yang dapat digunakan untuk mencari tahu tegangan tanah total dan *pore water pressure* adalah sebagai berikut.

- Tegangan total tanah

$$\sigma = \gamma \cdot H \quad (3.5)$$

dengan :

γ = Massa jenis tanah (N/m^3)

H = Kedalam pipa di dalam tanah (m)

- *Pore water pressure*

$$u = \gamma_w \cdot Z \quad (3.6)$$

dengan:

γ_w = Massa jenis air (N/m^3)

Z = Kedalaman muka air tanah (m)

Untuk menghitung tegangan total tanah perlu diketahui terlebih dahulu berapa massa jenis tanah tersebut. Ada dua tipe tanah berdasarkan besarnya kadar air pada pori-pori tanah, yaitu tanah kering dan tanah basah / jenuh. Setiap jenis tanah memiliki perhitungan massa jenis yang berbeda, yaitu sebagai berikut.

$$\gamma_{\text{dry}} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e} \quad (3.7)$$

dengan :

γ_{dry} = Massa jenis tanah kering (N/m^3)

G_s = Specific gravity (N/m^3)

γ_w = Massa jenis air = $9,8 \text{ (kN/m}^3\text{)}$

e = *pore void ratio*

Sedangkan untuk tanah basah / jenuh massa jenis dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{(G_s + e)}{(1+e)} \gamma_w \quad (3.8)$$

dengan :

γ_{sat} = Massa jenis tanah jenuh (N/m^3)

G_s = Specific gravity (N/m^3)

γ_w = Massa jenis air = $9,8 \text{ (kN/m}^3\text{)}$

e = *pore void ratio*

Setelah diketahui besarnya tegangan total dan *pore water pressure*-nya, maka dapat dihitung seberapa besar tegangan efektif tanah yang bekerja pada pipa. Pada kasus *upheaval buckling* kuat tegangan efektif tanah sangat berpengaruh dalam menahan tegangan pipa yang disebabkan oleh fluida yang berada di dalam pipa. Apabila tegangan efektif tanah tersebut tidak cukup kuat untuk menahan tegangan pipa akibat fluida, maka pipa dapat mengalami *upheaval buckling*.

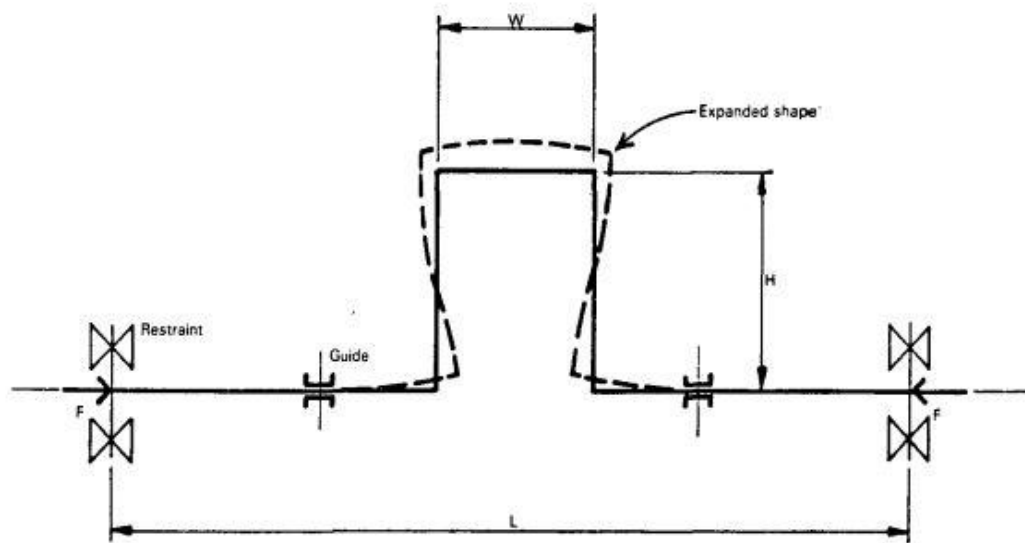
2.4 Expansion loop

Expansion loop adalah salah satu cara *repair* yang bisa dilakukan apabila pipa mengalami kegagalan *upheaval buckling* akibat *overstress* karena fungsi dari *expansion loop* adalah untuk mengontrol *physical properties* dari material yang digunakan, misalnya elongation (*stress-strain*) yang terjadi pada pipa dan lebih disebabkan oleh ekspansi termal. Untuk mengakomodasi *buckling* sebuah sistem *pipeline* harus memiliki panjang loop yang cukup untuk mengatasi hal tersebut. Berikut ini adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung panjang loop yang dibutuhkan untuk menahan defleksi *upheaval buckling* yang terjadi (Palmer, 1990).

$$l = \sqrt{\frac{3ED(y)}{2S}} \quad (3.9)$$

Dimana :

- l = Panjang loop (m)
- E = Modulu Elastisitas (MPa)
- D = Diameter eksternal pipa (m)
- y = Ekspansi termal yang harus ditahan pipa (m)
- S = *Specified Minimum Yield Stress* (MPa)



Gambar 2.3 Ilustrasi design *expansion loop*

Dalam mendesign *expansion loop* langkah awal adalah mencari seberapa panjang *expansion loop* yang dibutuhkan untuk mengakomodir besarnya defleksi pipa. Setelah diketahui seberapa panjang *expansion loop*, baru dapat didesign berapa dimensi *expansion loop* yang akan digunakan.

2.5 Analisa Keandalan

2.5.1 Konsep Dasar Keandalan

Keandalan struktur adalah peluang struktur untuk memenuhi tugas yang telah ditetapkan tanpa mengalami kegagalan selama kurun waktu tertentu apabila dioperasikan dengan benar dalam lingkungan tertentu. Kegagalan bahkan dapat terjadi dalam kasus langka seperti runtuhnya struktur akibat kesalahan dalam perancangan.

Didalam sistem rekayasa, sesungguhnya tidak ada parameter perancangan dan kinerja operasi yang dapat diketahui secara pasti. Secara garis besar, ketidakpastian dapat dikelompokkan menjadi tiga (Rosyid, 2007) :

1. Ketidakpastian fisik, yaitu ketidakpastian yang berhubungan dengan keragaman fisik seperti beban, sifat material dan ukuran material. Keragaman

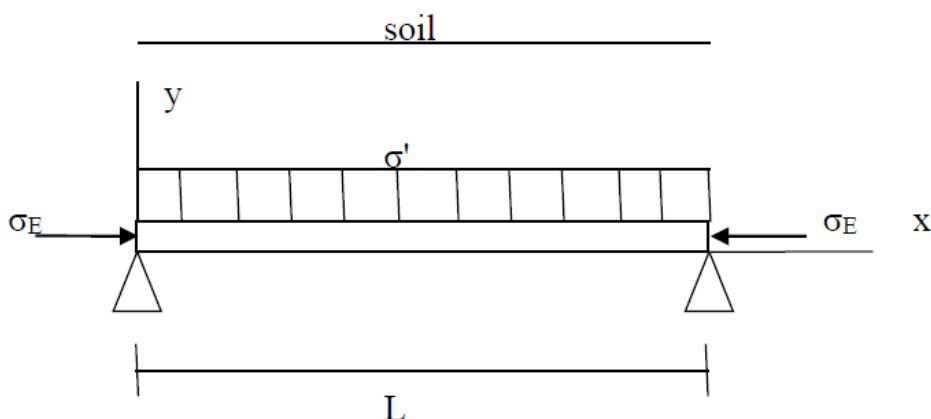
fisik ini hanya bisa dinyatakan dalam contoh data dengan pertimbangan praktis dan ekonomis.

2. Ketidakpastian statistic, berhubungan dengan data-data yang digunakan untuk membuat model secara probabilistic dari berbagai macam keragaman fisik di atas.
3. Ketidakpastian model, merupakan ketidakpastian yang berhubungan dengan anggapan dari jenis struktur yang dimodelkan secara matematis dalam bentuk deterministik atau probabilistik.

2.5.2 Moda Kegagalan

Moda kegagalan atau *limit state* adalah pernyataan lingkup masalah dalam mendefinisikan kriteria kegagalan. *Limit state* terdiri dari dua daerah tinjauan yaitu daerah aman dan gagal. *Probability of failure* yaitu jumlah probabilitas yang berlokasi di daerah gagal. Secara sistematis, *limit state* biasanya dsimbolkan dengan “g”. Untuk $g > 0$ dikatakan masuk daerah aman, sedangkan $g \leq 0$, maka sistem dikatakan berada dalam kondisi kritis.

Pada kasus kali ini pipa dimodelkan sebagai balok yang menerima gaya tekan aksial akibat internal pressure dan juga mendapatkan beban dari tanah yang



berada diatas sepanjang balok tersebut (Hariono, 2016).

Gambar 2.4 Ilustrasi balok-kolom yang mengalami gaya aksial dan transversal

dimana : σ' = tegangan efektif tanah (MPa)
 σ_E = tegangan ekivalen *von misses* (MPa)

L = panjang pipa (m)

Dapat dilihat dari gambar diatas bahwa pipa yang digambarkan oleh balok tersebut. Menerima beberapa gaya, yaitu gaya aksial yang disebabkan oleh tekanan dan temperature yang ada didalam pipa membuat pipa mengalami defleksi dan gaya tekan dari tanah yang ada diatas tanah. Dalam permasalahan *upheaval buckling* gaya tekan dari tanah memiliki peranan yang signifikan. Selain sebagai pelindung pipa dari bahaya yang ada dipermukaan, juga sebagai gaya yang berfungsi untuk menahan defleksi pipa yang disebabkan oleh gaya aksial pipa.

Sehingga didapat moda kegagalan dari pipa tersebut untuk masalah *upheaval buckling* ini adalah

Tegangan efektif tanah – Tegangan ekivalen ≥ 0

$$\left\{ \sqrt{\frac{P.D^2}{2.t} + \left[v \cdot \left(\frac{P.D}{2.t} \right) - E \cdot \alpha \cdot (T2 - T1) \right]^2} - \left[v \cdot \left(\frac{P.D}{2.t} \right) - E \cdot \alpha \cdot (T2 - T1) \right] \right\} \geq 0$$

2.5.3 Simulasi Monte Carlo

Metode Monte Carlo dipopulerkan oleh beberapa peneliti yakni : Stanislaw Ulam, Enrico Fermi, John von Neumann, dan Nicholas Metropolis. Namum orang yang dianggap sebagai penemu metode Monte Carlo adalah Stanislaw Ulam, seorang matematikawan berkebangsaan Polandia yang bekerja pada John von Neumann dalam US Manhattan Project. Pada tahun 1946, Ulam menemukan metode Monte Carlo ketika mengamati peluang memenangkan permainan kartu solitaire. Nama Monte Carlo sendiri berasal dari sebuah kasino di Monaco (Abdi, 2010)

Unsur pokok yang diperlukan dalam simulasi Monte Carlo adalah *random number generator*. Prinsip dasar metode ini adalah sampling numeric dengan bantuan *random number generator* (RNG), dimana simulasi dilakukan dengan mengambil beberapa sampel dari perubah acak berdasarkan distribusi peluang perubah acak tersebut. Sampel yang diambil tersebut dipakai sebagai input dalam

persamaan fungsi kerja $FK(X)$, dan harga $FK(X)$ kemudian dihitung. Jika $FK(X) < 0$, dan jumlah sampel tersebut adalah N , maka sistem yang ditinjau dianggap gagal sejumlah n kali. Sehingga peluang kegagalan sistem adalah rasio antara jumlah kejadian gagal dengan jumlah sampel.

$$Pof = n/N \quad (3.16)$$

Dimana :

n = Jumlah kejadian yang gagal

N = Jumlah sampel

Pof = Peluang kegagalan

Setelah diketahui besarnya peluang kegagalan (*probability of failure*) dari sistem tersebut, maka dapat dicari besarnya keandalan. Dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$K = 1 - Pof \quad (3.17)$$

Dimana :

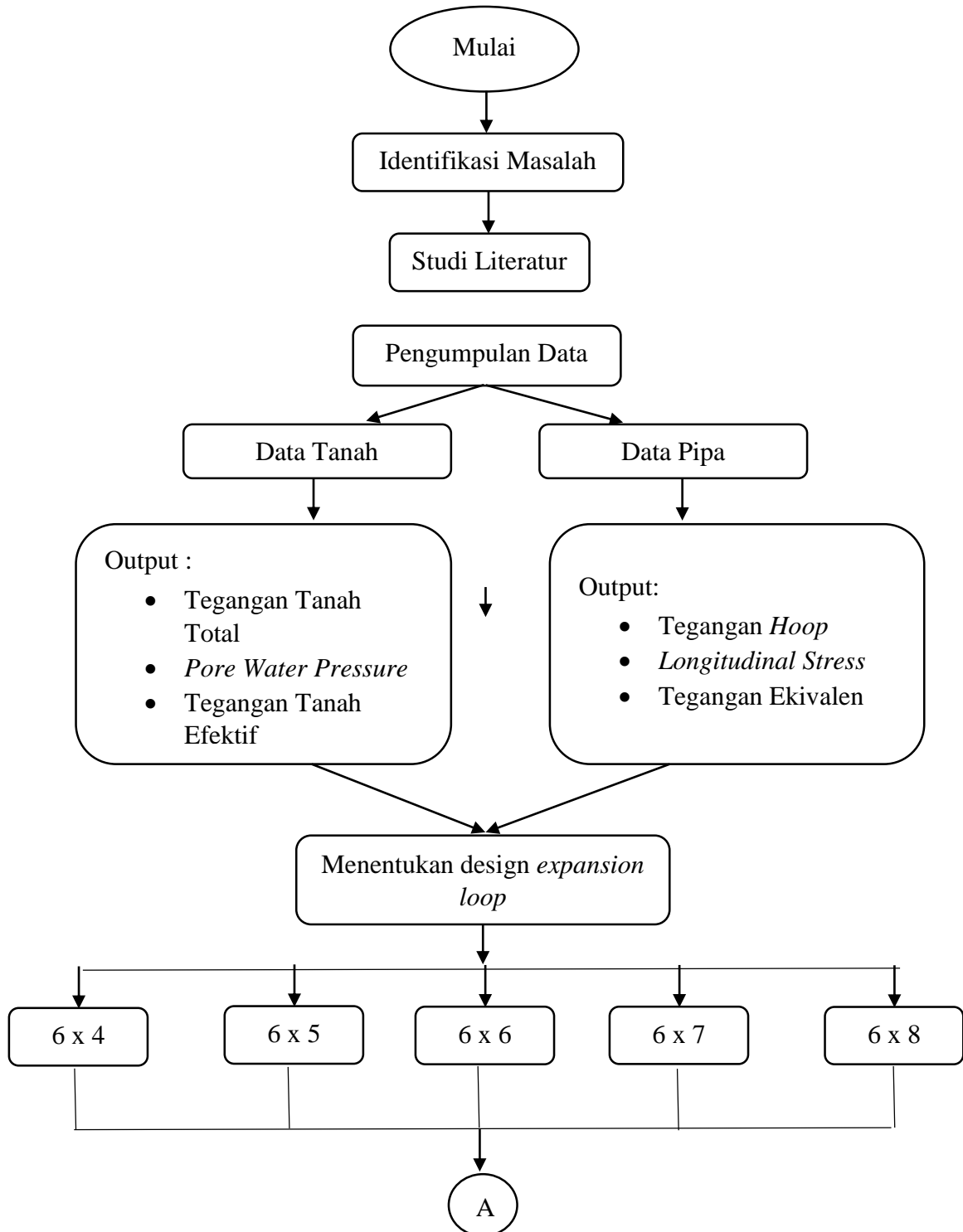
K = Keandalan

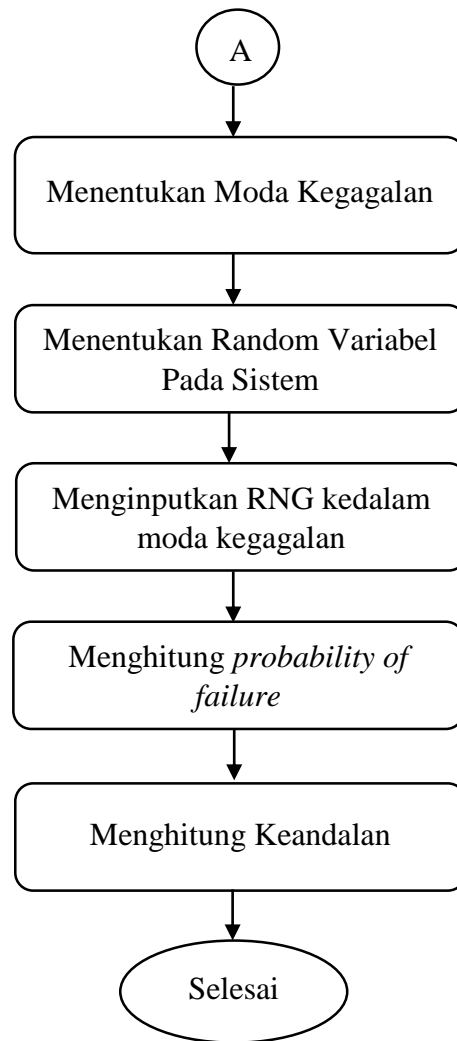
Pof = Peluang kegagalan

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian

3.2 Penjelasan Diagram Alir Penelitian

3.2.1 Identifikasi Masalah

Sebelum memulai penelitian perlu dilakukan identifikasi masalah, untuk mengetahui apa saja penyebab terjadinya masalah. Pada kasus *upheaval buckling* ada banyak hal yang dapat menjadi penyebab, antara lain tekanan isi pipa yang terlalu besar, suhu temperature fluida yang terlalu tinggi, maupun kondisi tanah yang tererosi dan kurang kuat.

3.2.2 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh informasi dari penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan analisa tegangan tegangan-tegangan yang bekerja pada pipa baik dari internal maupun eksternal. Sumber yang dijadikan referensi adalah jurnal, tugas akhir, tesis, dan buku pendukung yang berkaitan.

3.2.3 Pengumpulan Data

3.2.3.1 Data Tanah

Untuk analisa kasus *upheaval buckling* data tanah merupakan data penting yang harus dimiliki. Data tanah meliputi berat jenis tanah, kedalaman pipa, tinggi muka air tanah dari pipa, dan lain sebagainya. Data ini penting karena data ini akan digunakan untuk mencari berapa besarnya tegangan efektif tanah terhadap *buried pipeline*. Tegangan efektif tanah merupakan gaya penahan yang berfungsi menahan pipa untuk tetap pada tempatnya. Sehingga *upheaval buckling* dapat dihindari.

3.2.3.2 Data Pipa

Merupakan data-data operasional yang ada pada pipa. Data-data operasional ini kemudian diolah menjadi tegangan *hoop*, *longitudinal stress*, dan tegangan ekuivalen. Data ini perlu diolah untuk mengetahui gaya-gaya apa saja yang terjadi di dalam pipa akibat adanya aktivitas transmisi *fluida*.

3.2.4 Menentukan Moda Kegagalan

Dalam Metode simulasi Monte Carlo diperlukan sebuah persamaan untuk mengukur batas dimana sebuah sistem dapat dikatakan gagal atau berhasil. Yang biasanya digambarkan apabila besar dari moda kegagalan adalah minus, maka sistem dikatakan gagal. Sedangkan apabila besar dari moda kegagalan adalah positif, maka sistem dapat dikatakan berhasil. Pada kasus *upheaval buckling*, adapula moda kegagalannya, yaitu :

$$\text{Tegangan efektif tanah} - \text{Tegangan ekuivalen} \geq 0$$

$$\left\{ \sqrt{\frac{P.D^2}{2.t} + \left[v. \left(\frac{P.D}{2.t} \right) - E. \alpha. (T2 - T1) \right]^2} - \left[v. \left(\frac{P.D}{2.t} \right) - E. \alpha. (T2 - T1) \right] \right\} \geq 0$$

3.2.5 Menentukan Random Variabel Pada Sistem

Setelah diketahui moda kegagalan dari sistem tersebut. Langkah selanjutnya adalah mencari data apa saja yang memiliki perubah acak. Variabel yang memiliki perubah acak adalah variabel yang tidak pasti. Sehingga untuk menangani ketidakpastian tersebut perlu dilakukan *random number generate* pada variabel acak tersebut dengan memperhatikan distribusi kerapatan peluangnya. Kemudian dari *random number generate* tersebut didapatkan sekumpulan nilai acak yang memiliki range didalam distribusi kerapatan peluang untuk kemudian dimasukkan kedalam moda kegagalan.

3.2.6 Menginput RNG Kedalam Moda Kegagalan

Kemudian dari hasil *generate random number* untuk tiap-tiap variabel yang memiliki perubah acak. Dimasukkan kedalam persamaan moda kegagalan. Maka hasil dari input RNG kedalam moda kegagalan tadi dapat diketahui keberhasilan dari sistem tersebut dari kemungkinan *upheaval buckling*. Hal ini kemudian dilakukan secara berulang-ulang hingga akan didapatkan sebuah populasi data moda kegagalan. Pengulangan atau iterasi biasanya mencapai 10.000 kali. Semakin banyak semakin baik.

3.2.7 Menghitung Probability of Failure

Dari sekumpulan data hasil input RNG kedalam moda kegagalan, maka dihasilkan populasi data baru yang merupakan gambaran dari sistem tersebut berhasil atau gagal. Kemudian dilakukan perhitungan *probability of failure* untuk mengetahui seberapa besar kemungkinan sistem tersebut mengalami kegagalan berdasarkan hasil input RNG kedalam moda kegagalan tadi. Dengan menggunakan persamaan perbandingan antara jumlah kejadian gagal berbanding dengan jumlah iterasi.

$$PoF = \frac{n}{N}$$

3.2.8 Menghitung Keandalan

Setelah didapatkan besarnya *probability of failure* dari sistem tersebut, maka dapat dihitung keandalannya. Dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$K = 1 - PoF$$

(Halaman ini Sengaja Dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Identifikasi Masalah

Berdasarkan keadaan di lapangan yang tercermin pada foto berikut ini.



Gambar 4.1 Kondisi pipa *upheaval buckling*

Dapat ditarik kesimpulan bahwa kemungkinan penyebab terjadinya *upheaval buckling* pada design awal pipa tanpa *expansion loop* disebabkan oleh tererosinya lapisan tanah diatas pipa karena tingginya kadar air disekitar area pipa berada. Sehingga tebal tanah diatas pipa berkurang dari yang seharusnya setebal 2 m menjadi kurang dari 2 m.

4.2 Tegangan Pada Pipa

Pada pipa yang sedang beroperasi, aliran fluida dapat memberikan beban yang menyebabkan tekanan internal pada pipa. Selain dari tekanan internal yang disebabkan aliran fluida terdapat juga beban dari luar pipa yang dapat menyebabkan adanya tekanan eksternal pada pipa. Tekanan-tekanan tersebut perlu

dihitung untuk mengetahui seberapa besar tegangan yang diterima oleh pipa tersebut.

4.2.1 Tekanan Internal

Tekanan internal pada pipa biasa disebabkan oleh fluida yang mengalir di dalam pipa. Fluida ini sudah tentu memiliki tekanan dan temperatur yang dapat menyebabkan pipa mengalami tegangan. Tekanan Hoop (*Hoop Stress*) merupakan salah satu tekanan yang dapat terjadi akibat pengaruh fluida pada dinding material pipa disekitarnya. Persamaan dari *hoop stress* yang dapat terjadi akibat tekanan internal adalah sebagai berikut :

$$\sigma_h = \frac{P_i}{2t} D_o \quad (4.1)$$

dengan :

σ_h = *Hoop Stress* (MPa)

P_i = Tekanan internal (MPa)

t = Ketebalan nominal dinding pipa (m)

D_o = Diameter terluar pipa (m)

Yang mana dari hasil perhitungan didapatkan bahwa pipa menerima *hoop stress* sebesar 67,174 MPa. *Hoop stress* merupakan tegangan yang terjadi pada sekitar dinding pipa. Tegangan inilah yang kemudian menjadi pemicu terjadinya tegangan longitudinal yang dapat menyebabkan pipa memuai / berekspansi. Pada tegangan longitudinal merupakan jumlah total dari *thermal stress* dan *Poisson's effect*. Dengan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_L = [\nu \cdot \sigma_h] + [- E \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1)] \quad (4.2)$$

dengan :

σ_L = Tegangan Longitudinal (MPa)

ν = *Poisson's ratio*

σ_h = Tegangan Hoop (MPa)

- E = Modulus Young (MPa)
 α = Thermal Expansion Coeff ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 T_2 = Suhu Operasi Maksimum ($^{\circ}\text{C}$)
 T_1 = Suhu Pada Saat Instalasi ($^{\circ}\text{C}$)

Dari hasil perhitungan didapatkan pipa mengalami tegangan longitudinal sebesar 151,496 MPa. Setelah diketahui besarnya tegangan-tegangan tersebut, maka untuk mengetahui total tegangan yang diterima oleh pipa dengan memanfaatkan persamaan *Von Mises Equivalent Stress* dapat diketahui jumlah resultan dari seluruh tegangan yang bekerja pada pipa. Diketahui persamaan dari *Von Mises Equivalent Stress* ini adalah sebagai berikut :

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - \sigma_h \cdot \sigma_L} \quad (4.3)$$

dengan :

- σ_E = Tegangan resultan *von misses* (MPa)
 σ_h = Tegangan Hoop (MPa)
 σ_L = Tegangan Longitudinal (MPa)

Dengan besarnya tegangan resultan yang bekerja adalah sebesar 194,01 MPa. Tegangan inilah yang menjadi *driving force* penyebab terjadinya *upheaval buckling* memberikan dorongan pada pipa untuk berdefleksi kearah dengan gaya penahan yang paling lemah. Gaya penahan disini adalah gaya dorong tanah terhadap pipa tersebut. Gaya pada tanah ini kemudian dapat disebut sebagai gaya eksternal yang bekerja pada pipa.

4.2.2 Tekanan Eksternal

Gaya tahanan tanah merupakan gaya yang berfungsi sebagai *restrictive force* untuk meminimalisir adanya ekspansi berlebih pada pipa. Apabila pada pipa terdapat tegangan yang mempengaruhinya, maka pada tanah pun demikian. Ada tegangan yang bekerja akibat adanya tekanan dari material-material penyusun dari tanah itu sendiri.

Untuk mengetahui tekanan tanah yang bekerja pada pipa perlu diketahui besarnya tegangan efektifnya. Tegangan efektif adalah tegangan yang terjadi

akibat berat tanah efektif yang mempengaruhi kuat geser dan perubahan volume atau penurunan tanah. Diketahui persamaan tegangan efektif tanah adalah :

$$\sigma' = \sigma - u \quad (4.4)$$

dengan :

σ' = Tegangan tanah efektif (MPa)

σ = Tegangan tanah total (MPa)

u = *Pore Water Pressure* (MPa)

Adapula persamaan untuk tegangan total tanah dan *pore water pressure* adalah:

- Tegangan total tanah

$$\sigma = \gamma_s \cdot H \quad (4.5)$$

dengan :

γ_s = Massa jenis tanah (N/m³)

H = Kedalam pipa di dalam tanah (m)

- *Pore water pressure*

$$u = \gamma_w \cdot Z \quad (4.6)$$

dengan :

γ_w = Massa jenis air (N/m³)

Z = Tinggi air tanah dari pipa (m)

4.2.2.1 Tanah Kering

Untuk mengetahui tegangan efektif pertama yang harus dilakukan adalah mencari seberapa besar massa jenis tanah kering terlebih dahulu menggunakan persamaan.

$$\gamma_{\text{dry}} = \frac{G_s \cdot \gamma_w}{1+e} \quad (4.7)$$

dengan :

γ_{dry} = Massa jenis tanah kering (N/m³)

$$\begin{aligned}
 G_s &= \text{Specific gravity (N/m}^3\text{)} \\
 \gamma_w &= \text{Massa jenis air} = 9,8 \text{ (kN/m}^3\text{)} \\
 e &= \text{pore void ratio} = 1,025
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan besar dari massa jenis tanah kering adalah

Tabel 4.1 Massa jenis tanah kering

Gs	γ_{dry}	Satuan
1600	75960,89	kN/m ³
2650	125810,23	

Kemudian dapat dihitung besarnya tegangan efektif dari tanah kering tersebut dengan menggunakan persamaan (4.4). Sehingga didapat hasilnya untuk tiap-tiap kedalaman dimulai dari 2 m – 1,5 m adalah sebagai berikut

Tabel 4.2 Tegangan efektif tanah kering

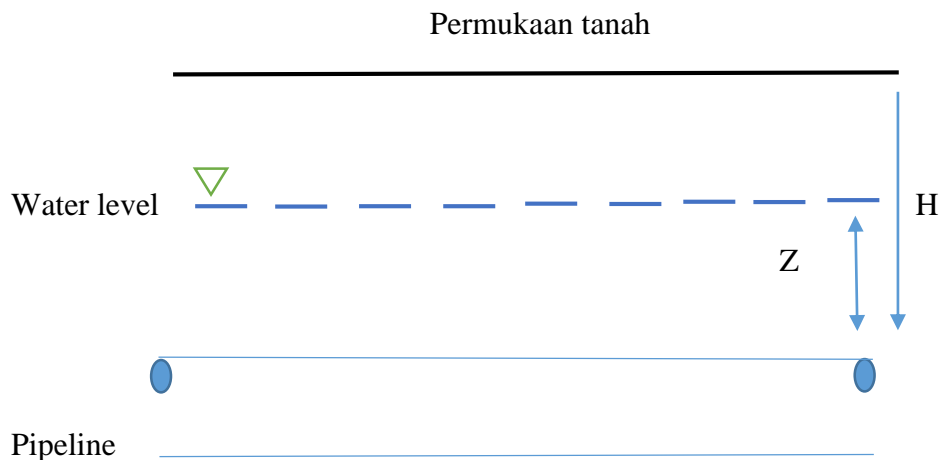
Ketebalan Tanah (m)	Tegangan Efektif Minimum (MPa)	Tegangan Efektif Maksimum (MPa)	Tegangan Ekuivalen Pipa (MPa)
2,0	152,086	251,88	194,01
1,9	144,48	239,29	194,01
1,8	136,87	226,69	194,01
1,7	129,27	214,10	194,01
1,6	121,66	201,50	194,01
1,5	114,06	188,91	194,01

Dapat dilihat pada tabel diatas besarnya tegangan tanah efektif yang bekerja pada pipa ditiap-tiap ketebalan tanah. Melihat dari hasil perhitungan tabel diatas didapatkan apabila ketebalan tanah hanya 1,5 m, maka pipa pasti akan mengalami *upheaval buckling*. Karena tegangan efektif tanah tidak mampu menahan tegangan ekuivalen pipa. Sedangkan untuk ketebalan tanah lainnya, pipa akan mengalami *upheaval buckling* ketika massa jenis tanah kurang memenuhi

yang mana massa jenis ini memiliki pengaruh langsung terhadap tegangan efektif tanah.

4.2.2.2 Tanah Jenuh (Saturated)

Pada tanah jenuh memiliki sedikit perbedaan. Perbedaannya adalah adanya pengaruh air pada pori-pori tanah yang dapat mempengaruhi tegangan efektif tanah tersebut. Pertama-tama yang perlu dilakukan adalah mencari massa jenis tanah jenuh terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.



Gambar 4.2 Ilustrasi kondisi pipa pada tanah jenuh

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{(G_s + e)}{(1 + e)} \gamma_w \quad (4.8)$$

dengan :

γ_{sat} = Massa jenis tanah jenuh (N/m^3)

G_s = Specific gravity (N/m^3)

γ_w = Massa jenis air = $9,8 \text{ (kN/m}^3\text{)}$

e = pore void ratio = 1,025

Sehingga didapat besarnya massa jenis tanah jenuh adalah sebagai berikut

Tabel 4.3 Massa jenis tanah jenuh

G_s	γ_{sat}	Satuan
1600	75965,85	kN/m^3
2650	125815,19	

Kemudian setelah diketahui besarnya massa jenis tanah jenuh, maka dapat dilanjutkan dengan menghitung tegangan efektif tanah dan *pore water pressure* dengan hasil sebagai berikut.

Tabel 4.4 Tegangan efektif tanah jenuh

Ketebalan Tanah (m)	Tegangan Efektif Minimum (MPa)	Tegangan Efektif Maksimum (MPa)	Pore Water Pressure Maksimum (MPa)	Tegangan Ekuivalen Pipa (MPa)
2,0	152,08	251,88	0,02	194,01
1,9	144,48	239,29	0,02	194,01
1,8	136,87	226,69	0,02	194,01
1,7	129,27	214,10	0,02	194,01
1,6	121,66	201,50	0,02	194,01
1,5	114,06	188,91	0,02	194,01

Setelah dilakukan perhitungan tegangan efektif tanah jenuh diketahui bahwa ada pengurangan tegangan efektif pada tanah yang disebabkan oleh adanya air pada bagian pori-pori tanah tersebut. Keberadaan air pada pori-pori tanah tersebut mempengaruhi densitas tanah yang membuat tanah tersebut tidak padat dan mudah bergerak karena adanya air pada pori-porinya.

Dalam perhitungan pada tabel diatas dapat diketahui tegangan efektif tanah untuk tiap-tiap ketebalan tanah. Dapat dilihat bahwa ketika ketebalan tanah hanya 1,5 m pipa akan mengalami kegagalan *upheaval buckling*. Sedangkan untuk ketebalan tanah lainnya, pipa baru akan mengalami kegagalan *upheaval buckling* ketika massa jenis tanah tidak dapat memenuhi besarnya tegangan ekuivalen yang bekerja pada pipa.

4.3 Pressure Drop

Pressure drop merupakan hal yang biasa terjadi pada sistem perpipaan. *Pressure drop* adalah fenomena dimana adanya penurunan tekanan di dalam pipa dari suatu titik ke titik lainnya, yang mana biasanya terjadi akibat adanya gaya gesek fluida dengan dinding pipa dan halangan-halangan lainnya termasuk adanya tambahan elbow dan *expansion loop*.

Untuk menghitung *pressure drop* pada pipa dapat menggunakan persamaan Darcy-Weisbach (Incopera, 2002), yaitu :

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad (4.9)$$

dengan:

ΔP = *Pressure drop* (MPa)

f = Darcy-Weisbach *coeffisien factor* = 0.025

L = Panjang total *expansion loop* (m)

D = Diameter pipa (m)

ρ = Massa jenis *fluida* (kg/m³)

V = Kecepatan aliran *fluida* (m/s)

Diketahui bahwa pipa gas mengalami *upheaval buckling* sehingga harus memotong pipa yang mengalami *buckling* kemudia akan ditambahkan *expansion loop* dengan ukurand dimensi 6 x 6 m untuk mengurangi kemungkinan terjadi kegagalan serupa di masa yang akan datang. Sehingga total panjang *expansion loop* yang akan digunakan untuk mengganti pipa lama yang rusak akibat *buckling* adalah sepanjang 28,512 m. Pipa tersebut digunakan untuk mentransmisikan *natural gas* dengan daya produksi hingga 21,15 MMSCFD.

Dengan menggunakan persamaan Darcy-Weisbach tersebut didapatkan adanya penurunan tekanan di dalam pipa tersebut yang diakibatkan adanya *expansion loop*. Besarnya penurunan tekanan yang terjadi adalah 4,501 MPa. Dimana tekanan awal gas adalah sebesar 7,791 MPa. Sehingga tekanan baru yang bekerja pada *buried pipe* dengan *expansion loop* 6 x 6 m selanjutnya adalah sebesar 3,289 MPa.

4.4 Design Expansion Loop Baru

Ada banyak faktor yang harus diperhitungkan dalam mendesign ulang *expansion loop* pada pipa. Seperti ukuran dari panjang dan lebar yang biasanya disesuaikan dengan besarnya defleksi yang terjadi pada kasus *upheaval buckling* ini. Faktor lain yang juga mempengaruhi design dari *expansion loop* adalah *safety factor* atau tegangan ijin dari pipa tersebut. Karena adanya perubahan dari ukuran dan design dapat mempengaruhi besarnya tegangan yang bekerja pada pipa itu sendiri.

Perubahan-perubahan ini haruslah memenuhi ketentuan *safety factor*, seperti yang tercantum dalam *codes* ASME B31.8-2000 untuk *onshore gas pipeline* adalah sebagai berikut.

Tabel 4.5 Tegangan ijin untuk pipa gas

Allowable Stress		
<i>Hoop Stress</i>	<i>Longitudinal Stress</i>	<i>Combined Stress</i>
72% SMYS	80% SMYS	90% SMYS

Tegangan ijin inilah yang menjadi acuan dalam perubahan design dari *expansion loop*, agar setiap perubahan tersebut masih masuk ke dalam batas aman. Pada perubahan design kali ini akan dilakukan perubahan panjang pipa pada *expansion loop*. Pertambahan panjang *expansion loop* dapat memberikan ruang untuk berelongasi yang lebih baik daripada *expansion loop* yang hanya memiliki panjang yang lebih pendek, sehingga pada *expansion loop* yang lebih panjang akan mengalami *pressure drop* yang lebih besar.

Perubahan design *expansion loop* yang akan digunakan adalah menambah panjang *expansion loop* sebesar ± 2 m. Sehingga design *expansion loop* yang nantinya akan dibandingkan adalah design *expansion loop* dengan spesifikasi 6 x 4 m ; 6 x 5 m ; 6 x 6 m ; 6 x 7 m ; dan 6 x 8 m.

Langkah selanjutnya setelah memilih design *expansion loop* yang baru adalah menghitung besarnya *pressure drop* dari tiap-tiap design *expansion loop*. Kemudian dari hasil *pressure drop* dilakukan perhitungan ulang untuk mengetahui apakah dengan berubahnya *internal pressure* tadi pipa masih berada di dalam tegangan ijin berdasarkan *codes* ASME B31.8-2000.

1. *Pressure Drop*

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad (4.10)$$

dimana :

ΔP = *Pressure drop* (MPa)

f = Darcy-Weisbach *coeffisien factor* = 0,025

L = Panjang total *expansion loop* (m)

D = Diameter pipa (m)

ρ = Massa jenis *fluida* (kg/m³)

V = Kecepatan aliran *fluida* (m/s)

Dengan menggunakan persamaan diatas, maka dapat dihitung besarnya *pressure drop* dari tiap-tiap design *expansion loop*. Besarnya *pressure drop* dari tiap-tiap design *expansion loop* adalah sebagai berikut.

Tabel 4.6 *Pressure drop expansion loop*

Design	<i>Pressure drop</i> (MPa)	<i>Internal pressure</i> (MPa)
6 x 4	4,185	3,605
6 x 5	4.343	3,447
6 x 6	4,501	3,289
6 x 7	4,658	3,132
6 x 8	4,816	2,974

Setelah didapat *pressure drop*, maka dapat diketahui *internal pressure* sisa yang keluar dari sistem *expansion loop*. *Internal pressure* sisa tersebut haruslah sesuai tegangan ijin untuk dapat benar-benar diimplementasikan kedalam design.

1. Tegangan *Hoop*

$$\sigma_h = \frac{P_i}{2t} D_o \leq 72\% \text{ SMYS} \quad (4.11)$$

dimana :

Pi = Maksimum tekanan operasi (MPa)

Do = Diameter terluar (mm)

t = ketebalan pipa (mm)

SMYS = *Specified Minimum Yield Stress* = 359 MPa

$$= 72\% \times 359 \text{ MPa} = 258,48$$

Tabel 4.7 Tegangan *hoop* akibat *expansion loop*

Design	<i>Internal Pressure</i> (MPa)	Tegangan <i>Hoop</i> (MPa)	72% SMYS (MPa)	Status
6 x 4	3,605	31,088	258,48	OK
6 x 5	3,447	29,727	258,48	OK
6 x 6	3,289	28,365	258,48	OK
6 x 7	3,132	27,004	258,48	OK
6 x 8	2,974	25,643	258,48	OK

Diketahui dari tabel diatas bahwa apabila *expansion loop* diaplikasikan pipa masih masuk ke dalam batas tegangan ijin. Sehingga design *expansion loop* dapat diaplikasikan kedalam design tambahan untuk *buried pipeline* tersebut.

2. *Longitudinal Stress*

$$\sigma_L = \nu \cdot \sigma_h + [- E \cdot \alpha \cdot (T_2 - T_1)] \leq 80\% \text{ SMYS} \quad (4.12)$$

dimana :

σ_L = Tegangan Longitudinal (MPa)

ν = *Poisson's ratio* = 0,3

σ_h = Tegangan Hoop (MPa)

E = Modulus Young (MPa) = 203.000 MPa

α = Thermal Expansion Coeff ($^{\circ}\text{C}^{-1}$) = $1,17 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

T_2 = Suhu Operasi Maksimum ($^{\circ}\text{C}$) = 101,67 $^{\circ}\text{C}$

T_1 = Suhu Pada Saat Instalasi ($^{\circ}\text{C}$) = 29,4 $^{\circ}\text{C}$

SMYS = *Specified Minimum Yield Stress* = 359 MPa

= 80 % x 359 MPa = 287,2 MPa

Tabel 4.8 *Longitudinal stress akibat expansion loop*

Design	<i>Longitudinal Stress</i> (MPa)	80% SMYS (MPa)	Status
6 x 4	162,322	287,2	OK
6 x 5	162,730	287,2	OK
6 x 6	163,138	287,2	OK
6 x 7	163,547	287,2	OK
6 x 8	163,955	287,2	OK

Diketahui dari tabel diatas bahwa apabila *expansion loop* diaplikasikan pipa masih masuk ke dalam batas tegangan ijin. Sehingga design *expansion loop* dapat diaplikasikan kedalam design tambahan untuk *buried pipeline* tersebut.

3. *Combined Stress* (Tegangan Ekivalen)

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2} \leq 90\% \text{ SMYS} \quad (4.13)$$

dimana :

σ_E = Tegangan resultan *von misses* (MPa)

σ_h = Tegangan Hoop (MPa)

σ_L = Tegangan Longitudinal (MPa)

SMYS = *Specified Minimum Yield Stress* = 359 MPa

= 90 % x 359 MPa = 323,1 MPa

Tabel 4.9 Tegangan ekivalen akibat *expansion loop*

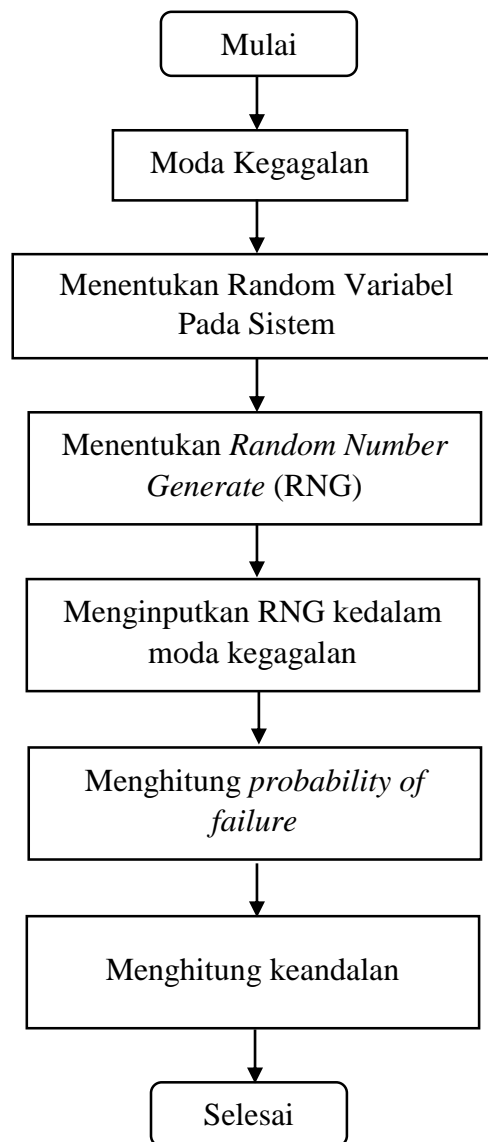
Design	Tegangan Ekivalen (MPa)	90% SMYS (MPa)	Status
6 x 4	179,892	323,1	OK
6 x 5	179,450	323,1	OK
6 x 6	179,015	323,1	OK
6 x 7	178,587	323,1	OK
6 x 8	178,166	323,1	OK

Diketahui dari tabel diatas bahwa apabila *expansion loop* diaplikasikan pipa masih masuk ke dalam batas tegangan ijin. Sehingga design *expansion loop* dapat diaplikasikan kedalam design tambahan untuk *buried pipeline* tersebut.

4.5 Keandalan Dengan Metode Monte Carlo

Dalam mendesign sebuah sistem, maka diperlukan perhitungan keandalan untuk mengetahui apakah sistem tersebut cukup baik untuk diimplementasikan. Cara terbaik dalam mendesign sebuah sistem adalah dengan membandingkan beberapa macam design untuk kemudian dipilih yang terbaik. Ada banyak metode yang dapat digunakan untuk menghitung keandalan sebuah sistem.

Ketika suatu sistem yang sedang dipelajari mengandung variabel atau parameter yang memiliki nilai random, atau mengandung perubah acak, maka metode simulasi Monte Carlo dapat digunakan untuk memecahkan persoalan ini. (Rosyid, 2007). Berikut ini adalah diagram alir pengerjaan analisa keandalan dengan menggunakan metode simulasi Monte Carlo.



Gambar 4.3 Diagram alir analisa keandalan dengan metode simulasi Monte Carlo

4.5.1 Moda Kegagalan

Pada kasus *upheaval buckling* berikut ini adalah moda kegagalan yang digunakan untuk mengetahui apakah sistem dapat diandalkan atau tidak.

$$\text{Tegangan Efektif Tanah} - \text{Tegangan Ekvivalen Pipa} \geq 0$$

$$[(\gamma_{soil} \times H) - (\gamma_{water} \times Z)] - \left[\sqrt{\left(\frac{P.D\sigma}{z.t}\right)^2 + \left(v \cdot \left(\frac{P.D\sigma}{z.t}\right) - E \cdot \alpha \cdot (T2 - T1)\right)^2} - \left(\left(\frac{P.D\sigma}{z.t}\right) \cdot \left(v \cdot \left(\frac{P.D\sigma}{z.t}\right) - E \cdot \alpha \cdot (T2 - T1)\right)\right) \right] \geq 0$$

Moda kegagalan diatas merupakan moda kegagalan untuk kasus *upheaval buckling*, yang mana merupakan pengurangan antara tegangan efektif tanah yang bekerja pada pipa dengan tegangan ekivalen yang ada pada pipa akibat *fluida* yang ada di dalamnya.

4.5.2 Random Variabel

Pada kasus *upheaval buckling* kali ini ada beberapa variabel yang memiliki nilai perubah acak, yaitu :

1. Berat Jenis Tanah

Berat jenis tanah merupakan salah satu syarat utama untuk menghitung tegangan efektif tanah. Berat jenis tanah juga merupakan sebuah variabel yang tidak pasti tanpa adanya eksperimen di laboratorium dan memiliki range data yang sangat besar. Sehingga berat jenis tanah dapat dikategorikan sebagai variabel yang memiliki perubah acak.

2. Kedalaman Muka Air Tanah

Selain berat jenis tanah, kedalaman muka air tanah juga merupakan sebuah variabel yang tidak pasti. Dimana kedalaman muka air tanah ini akan mempengaruhi besarnya *pore water pressure* pada pori-pori tanah. Tidak ada cara yang pasti untuk dapat mengetahui tingginya muka air tanah. Sehingga untuk menyelesaikan persamaan tegangan efektif tanah dapat dilakukan dengan bantuan *random number generate*.

3. Tekanan Isi

Sistem perpipaan merupakan sebuah sistem yang digunakan untuk mentransmisikan *fluida* dari satu tempat ke tempat lainnya. Metode yang digunakan untuk mentransmisikan *fluida* tersebut adalah dengan memanfaatkan perbedaan tekanan di dua tempat berbeda tersebut. Perbedaan tekanan tersebut yang kemudian mendorong *fluida* untuk berpindah ke tempat lainnya. Besarnya tekanan isi ini merupakan sebuah

variabel yang mengandung perubah acak. Dimana ada banyak sekali kemungkinan yang dapat mendorong terjadinya perubahan tekanan yang tidak dapat kita hitung.

4.5.3 *Random Number Generate (RNG)*

Dalam menghasilkan perubah acak haruslah berdasarkan distribusi peluang acak dari variabel tersebut. Yang mana untuk tiap-tiap variabel tadi memiliki distribusi peluang acak sebagai berikut.

1. Berat Jenis Tanah

Distribusi peluang acak = $1600 - 2650 \text{ kg/m}^3$

2. Kedalaman Muka Air Tanah

Distribusi peluang acak = $0 - 2 \text{ m}$

3. Tekanan Isi

Distribusi peluang acak = $0 - 3,289 \text{ MPa}$ (untuk *expansion loop* 6 x 6 m)

Distribusi peluang acak = $0 - 3,132 \text{ MPa}$ (untuk *expansion loop* 6 x 7 m)

Distribusi peluang acak = $0 - 2,974 \text{ MPa}$ (untuk *expansion loop* 6 x 8 m)

Distribusi peluang acak = $0 - 2,816 \text{ MPa}$ (untuk *expansion loop* 6 x 9 m)

Distribusi peluang acak = $0 - 2,440 \text{ MPa}$ (untuk *expansion loop* 6 x 10 m)

Variabel diatas mengikuti distribusi uniform yang mana kemungkinan untuk setiap data muncul adalah sama besarnya. Setelah diketahui distribusi peluang acak dari tiap-tiap variabel acak yang ada, maka *random number generate* dapat dilakukan. Dengan bantuan Microsoft Excel, *random number generate* dapat dilakukan dengan *command* RAND.

4.5.4 *Input RNG Kedalam Moda Kegagalan*

Setelah diketahui distribusi peluang acaknya, maka RNG dapat dilakukan. RNG dilakukan untuk tiap-tiap design *expansion loop* untuk kemudian dicari besarnya keandalan dari tiap-tiap design *expansion loop*. Berikut ini adalah tabel input RNG terhadap moda kegagalan.

Tabel 4.10 Input RNG ke Moda Kegagalan untuk *expansion loop* 6 x 4 m

Tegangan efektif tanah							-	Tegangan Ekuivalen						Total
γ_{soil}	H	Total	γ_{water}	Z	Total	Total		P	σ_h	Poisson	Termal	Total	Ekivalen	
82,75	2	165,49	9,81	1,72	0,016	165,47		0,41	3,56	1,07	171,65	170,58	168,83	-19,25
78,78	2	157,56	9,81	0,82	0,008	157,55		3,04	26,17	7,85	171,65	163,8	152,4	-18,72
113,73	2	227,45	9,81	0,4	0,003	227,45		0,11	0,92	0,28	171,65	171,37	170,92	-18,49
88,55	2	177,1	9,81	0,79	0,007	177,09		0,42	3,62	1,09	171,65	170,56	168,78	-18,38
117,72	2	235,43	9,81	0,19	0,001	235,43		2,38	20,51	6,15	171,65	165,5	156,25	-18,06
116,71	2	233,42	9,81	0,85	0,008	233,41		2,31	19,92	5,97	171,65	165,67	156,67	100,66
83,07	2	166,13	9,81	1,6	0,015	166,12		3,23	27,87	8,36	171,65	163,29	151,29	100,84
102,94	2	205,89	9,81	0,74	0,007	205,88		0,27	2,34	0,7	171,65	170,95	169,79	101,2
119,6	2	239,21	9,81	0,77	0,007	239,2		3,52	30,36	9,11	171,65	162,54	149,69	101,35
92,34	2	184,69	9,81	0,4	0,003	184,68		1,78	15,33	4,6	171,65	167,05	159,94	101,76

Setelah dilakukan input RNG kedalam moda kegagalan didapatkan banyaknya jumlah kejadian gagal adalah 844 kejadian. Hal ini menandakan, bahwa untuk design *expansion loop* 6 x 4 m dari 10.000 kemungkinan ada peluang untuk sistem dapat gagal sebanyak 844 kali.

Tabel 4.11 Input RNG ke Moda Kegagalan untuk *expansion loop* 6 x 5 m

Tegangan efektif tanah							-	Tegangan Ekuivalen						Total
γ_{soil}	H	Total	γ_{water}	Z	Total	Total		P	σ_h	Poisson	Termal	Total	Ekivalen	
84,43	2	168,87	9,81	1,65	0,016	168,85		3,29	28,37	8,51	171,65	163,14	150,96	-19,59
77,36	2	154,71	9,81	0,49	0,004	154,71		2,69	23,23	6,97	171,65	164,68	154,38	-18,23
124,24	2	248,47	9,81	0,9	0,008	248,47		0,2	1,76	0,53	171,65	171,12	170,25	-18,21
78,75	2	157,51	9,81	0,96	0,009	157,5		0,02	0,21	0,06	171,65	171,59	171,48	-18,15
102,02	2	204,04	9,81	0,02	0,001	204,04		0,73	6,25	1,88	171,65	169,77	166,74	-18,15
108,88	2	217,77	9,81	1,2	0,011	217,76		2,36	20,34	6,1	171,65	165,55	156,37	100,79
87,72	2	175,45	9,81	0,5	0,004	175,44		2,49	21,49	6,45	171,65	165,2	155,57	100,8
83,12	2	166,23	9,81	0,72	0,007	166,22		0,73	6,28	1,88	171,65	169,77	166,72	100,86
90,35	2	180,71	9,81	1,75	0,017	180,69		2,51	21,6	6,48	171,65	165,17	155,5	101,15
107,94	2	215,89	9,81	0,56	0,005	215,88		1,27	10,96	3,29	171,65	168,36	163,16	101,35

Setelah dilakukan input RNG kedalam moda kegagalan didapatkan banyaknya jumlah kejadian gagal adalah 895 kejadian. Hal ini menandakan, bahwa untuk design *expansion loop* 6 x 5 m dari 10.000 kemungkinan ada peluang untuk sistem dapat gagal sebanyak 895 kali.

Tabel 4.12 Input RNG ke Moda Kegagalan untuk *expansion loop* 6 x 6 m

Tegangan efektif tanah							-	Tegangan Ekuivalen						Total
γ_{soil}	H	Total	γ_{water}	Z	Total	Total		P	σ_h	Poisson	Termal	Total	Ekivalen	
89,22	2	178,43	9,81	1,53	0,015	178,42		0,82	7,07	2,12	171,65	169,53	166,1	-19,35
107,65	2	215,31	9,81	0,33	0,003	215,31		1,4	12,04	3,61	171,65	168,04	162,35	-19,21
117,22	2	234,45	9,81	1,15	0,011	234,44		2,07	17,81	5,34	171,65	166,31	158,16	-18,11
123,42	2	246,84	9,81	1,01	0,009	246,83		2,01	17,35	5,21	171,65	166,44	158,48	-18,03
104,18	2	208,36	9,81	0,22	0,002	208,36		0,18	1,57	0,47	171,65	171,18	170,4	-17,94
123,51	2	247,02	9,81	0,15	0,001	247,01		0,09	0,74	0,22	171,65	171,43	171,06	99,38
82,65	2	165,3	9,81	0,67	0,006	165,29		2,78	23,98	7,19	171,65	164,45	153,87	99,62
100,44	2	200,89	9,81	1,46	0,014	200,87		2,53	21,81	6,54	171,65	165,1	155,35	99,66
89,57	2	179,14	9,81	0,71	0,007	179,13		0,12	1,07	0,32	171,65	171,33	170,8	99,69
94,32	2	188,63	9,81	1,16	0,011	186,62		2,68	23,08	6,93	171,65	164,72	154,48	99,7

Setelah dilakukan input RNG kedalam moda kegagalan didapatkan banyaknya jumlah kejadian gagal adalah 946 kejadian. Hal ini menandakan, bahwa untuk design *expansion loop* 6 x 6 m dari 10.000 kemungkinan ada peluang untuk sistem dapat gagal sebanyak 946 kali.

Tabel 4.13 Input RNG ke Moda Kegagalan untuk *expansion loop* 6 x 7 m

Tegangan efektif tanah							-	Tegangan Ekuivalen						Total
γ_{soil}	H	Total	γ_{water}	Z	Total	Total		P	σ_h	Poisson	Termal	Total	Ekivalen	
87,39	2	174,78	9,81	0,77	0,007	174,77		2,11	18,18	5,46	171,65	166,19	157,89	-19,07
107,37	2	214,75	9,81	1,85	0,018	214,73		0,44	3,79	1,14	171,65	170,51	168,65	-18,78
109,52	2	219,04	9,81	0,57	0,005	219,04		1,34	11,55	3,46	171,65	168,18	162,72	-18,25
77,76	2	155,52	9,81	0,72	0,007	155,52		1,37	11,82	3,55	171,65	168,1	162,52	-18,08
115,58	2	231,16	9,81	1,3	0,012	231,15		1,95	16,82	5,05	171,65	166,6	158,86	-17,94
123,01	2	246,03	9,81	1,64	0,016	246,01		1,4	12,09	3,63	171,65	168,02	162,31	98,72
80,13	2	160,27	9,81	1,62	0,015	160,25		2,84	24,46	7,34	171,65	164,31	153,55	98,79
87,48	2	174,97	9,81	1,8	0,017	174,95		2,49	21,45	6,44	171,65	165,21	155,6	98,8
107,35	2	214,69	9,81	0,14	0,001	214,69		1,36	11,76	3,53	171,65	168,12	162,56	99,07
102,79	2	205,58	9,81	0,83	0,008	205,58		0,91	7,85	2,35	171,65	169,29	165,51	99,15

Setelah dilakukan input RNG kedalam moda kegagalan didapatkan banyaknya jumlah kejadian gagal adalah 965 kejadian. Hal ini menandakan, bahwa untuk design *expansion loop* 6 x 7 m dari 10.000 kemungkinan ada peluang untuk sistem dapat gagal sebanyak 965 kali.

Tabel 4.14 Input RNG ke Moda Kegagalan untuk *expansion loop* 6 x 8 m

Tegangan efektif tanah							-	Tegangan Ekuivalen						Total
γ_{soil}	H	Total	γ_{water}	Z	Total	Total		P	σ_h	Poisson	Termal	Total	Ekivalen	
112,97	2	225,93	9,81	1,98	0,019	225,91		0,73	6,29	1,89	171,65	169,76	166,71	-19,13
115,95	2	231,91	9,81	0,33	0,003	231,9		0,01	0,01	0,01	171,65	171,64	171,64	-19,06
103,57	2	207,15	9,81	1,43	0,014	207,13		0,01	0,1	0,03	171,65	171,62	171,57	-18,58
125,65	2	251,31	9,81	1,23	0,012	251,3		1,52	13,14	3,94	171,65	167,71	161,54	-18,36
100,15	2	200,31	9,81	1,12	0,011	200,3		2,19	18,92	5,67	171,65	165,97	157,37	-18,3
100,89	2	201,78	9,81	1,93	0,019	201,76		2,26	19,51	5,85	171,65	165,8	156,95	97,56
99,56	2	199,11	9,81	0,06	0,001	199,11		0,19	1,68	0,5	171,65	171,14	170,31	97,57
110,32	2	220,64	9,81	1,59	0,015	220,63		0,99	8,52	2,56	171,65	169,09	165,0	97,7
87,39	2	174,78	9,81	1,0	0,009	174,77		2,09	18,03	5,41	171,65	166,24	157,99	97,77
109,26	2	218,51	9,81	1,43	0,014	218,5		1,94	16,72	5,01	171,65	166,63	158,94	97,8

Setelah dilakukan input RNG kedalam moda kegagalan didapatkan banyaknya jumlah kejadian gagal adalah 1.011 kejadian. Hal ini menandakan, bahwa untuk design *expansion loop* 6 x 8 m dari 10.000 kemungkinan ada peluang untuk sistem dapat gagal sebanyak 1.011 kali.

4.5.5 Probability of Failure

Setelah melakukan input seluruh RNG kedalam persamaan moda kegagalan seperti pada tabel diatas. Maka langkah selanjutnya adalah menghitung *porbability of failure* dari tiap-tiap design. *Probability of failure* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan.

$$PoF = \frac{n}{N}$$

dimana :

PoF = Peluang Terjadinya Kegagalan (*Probability of failure*)

n = Jumlah kejadian yang gagal

N = Jumlah iterasi

Dengan menggunakan persamaan diatas, maka *probability of failure* dari tiap-tiap design *expansion loop* dapat diketahui. Berikut ini adalah besar *probability of failure* dari tiap-tiap design *expansion loop*.

Tabel 4.15 *Probability of failure* tiap design *expansion loop*

<i>Expansion Loop</i>	Jumlah Kejadian Gagal	Jumlah Iterasi	<i>Probability of Failure</i>
6 x 4	844	10.000	0,0844
6 x 5	895	10.000	0,0895
6 x 6	946	10.000	0,0946
6 x 7	965	10.000	0,0965
6 x 8	1011	10.000	0,1011

Probability of failure merupakan kemungkinan terjadinya kegagalan dari suatu sistem. Semakin besar hasilnya, maka semakin besar kemungkinan sistem tersebut mengalami kegagalan.

4.5.6 Keandalan

Setelah didapatkan besar *probability of failure* dari tiap-tiap design *expansion loop*. Barulah kemudian dapat dicari besarnya keandalan dari tiap-tiap design tersebut. Dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$K = 1 - \text{PoF}$$

dimana :

K = Keandalan

PoF = Peluang Terjadinya Kegagalan

Dengan persamaan diatas, maka didapatkan besar keandalan dari tiap-tiap design *expansion loop* adalah sebagai berikut.

Tabel 4.16 Keandalan tiap design *expansion loop*

<i>Expansion Loop</i>	<i>Probability of Failure</i>	Keandalan
6 x 4	0,0844	0,9156
6 x 5	0,0895	0,9105
6 x 6	0,0946	0,9054
6 x 7	0,0965	0,9035
6 x 8	0,1011	0,8989

Dapat diperhatikan pada tabel diatas, bahwa semakin besar *expansion loop* akan memiliki keandalan yang lebih rendah daripada dengan yang berukuran lebih kecil. Hal ini dapat terjadi karena terlalu besarnya *pressure drop* membuat *longitudinal stress* akibat *poisson's effect* tidak dapat mengimbangi besarnya *longitudinal stress* akibat *thermal* atau suhu.

Sehingga design *expansion loop* yang terbaik berdasarkan data perhitungan keandalan diatas adalah *expansion loop* dengan ukuran 6 x 4 m, dengan keandalan sebesar 0,9156 atau 91,56%.

LAMPIRAN

Kondisi saat ditemukan *upheaval buckling*





Instalasi *expansion loop*



Kondisi *expansion loop* 6 x 6 m yang digunakan.

